

Versuch: P1-26

Aeromechanik

- Auswertung -

Versuchsdurchführung: Montag, 16.1.2006

Inhaltsverzeichnis

1	Untersuchung des Luftstroms	2
1.1	Ortsabhängigkeit des dynamischen Drucks	2
1.2	Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Motorspannung	3
2	Strömungswiderstand	5
2.1	Rücktrieb und Stirnfläche	5
2.2	Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit	5
2.3	Rücktrieb und Körperform, Oberflächenbeschaffenheit	6
3	Tragflügel	7
3.1	Auftrieb und Strömungswiderstand	7
3.2	Tragflächendruck	10

Demonstrationsversuche

Zu Beginn des Versuchs führten wir als Lehramtsstudenten die Demonstrationsversuche stellvertretend für die anderen Gruppen durch. Bei den Demonstrationsversuchen geht es zunächst um die Handhabung von Scheiben- und Rohrsonde sowie des Manometers, wobei wir die in der Vorbereitung erwähnten Möglichkeiten, die verschiedenen Drücke mit kleinstmöglichem Fehler zu messen, ausprobierten.

Im Venturi-Rohr beobachteten wir wie erwartet in der Mitte einen (statischen) Unterdruck, da sich die Luft durch den verengten Querschnitt schneller bewegen muss. Nur die ersten beiden Messpunkte nahe dem Winderzeuger zeigten einen viel zu hohen Druck an, was aber daran lag dass sie aufgrund der Geometrie einen Teil des dynamischen Drucks mitregistrierten.

Wie in der Vorbereitung bereits theoretisch durchdacht wurde, bestätigte sich der nach außen hin abnehmende Verlauf des dynamischen Drucks an zwei Kreisscheiben. Allerdings - und das gilt für sämtliche Teile dieses Versuchs - sei im Vorhinein erwähnt, dass sämtliche Messungen recht ungenau und mit einem relativ großen Fehler behaftet sind. Die Ursachen hierfür sind in der Inhomogenität des Luftstroms und den relativ groben Messverfahren (Kraftmesser angeschlossen mit Umlenkrollen, Manometer...) zu suchen.

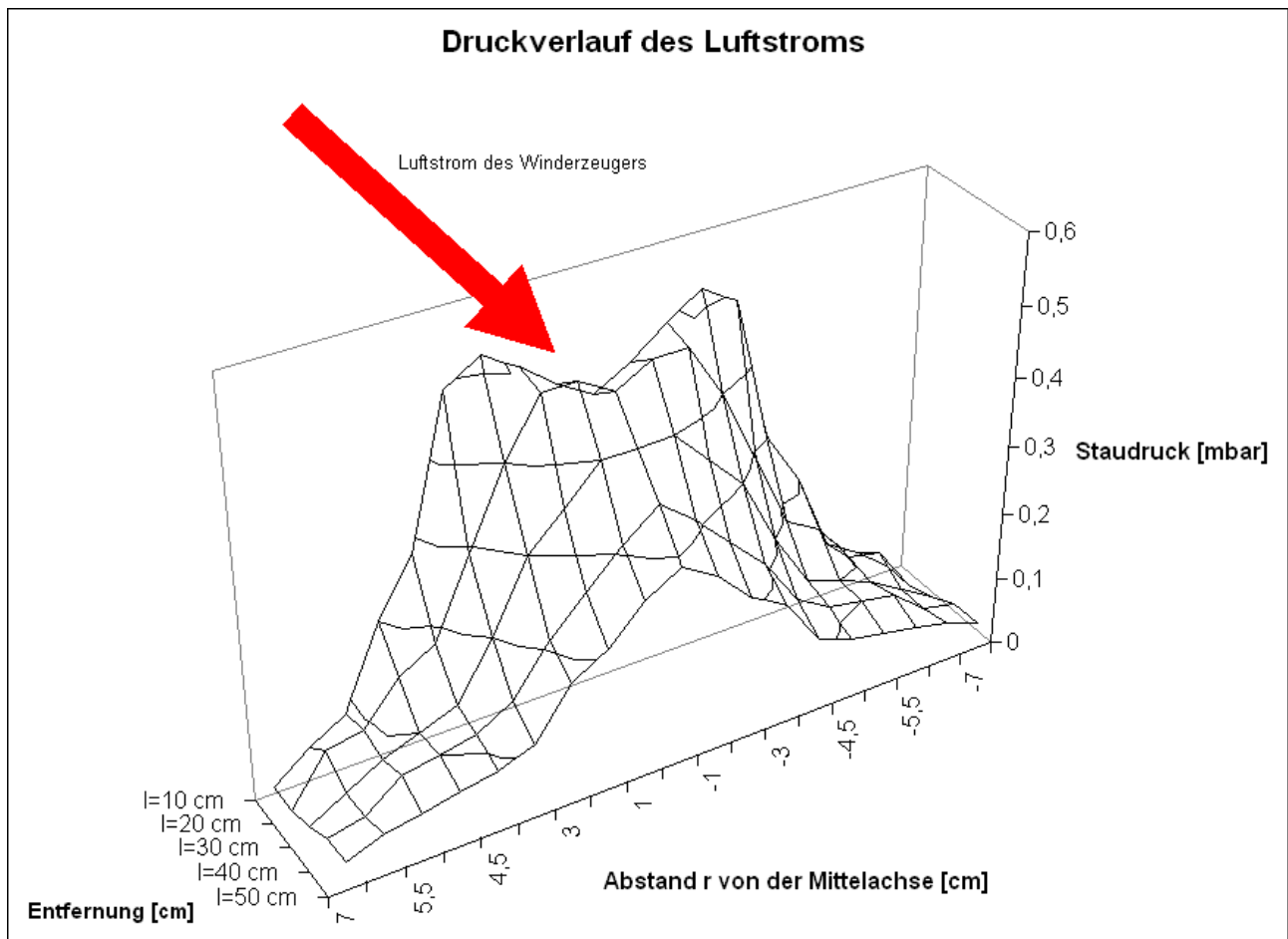
1 Untersuchung des Luftstroms

1.1 Ortsabhängigkeit des dynamischen Drucks

In diesem Versuchsteil sollte der dynamische Druck des Luftstromfeldes des Winderzeugers gemessen werden. Hierzu benutzten wir das Prandtl'sche Staurohr, da mit diesem Instrument der dynamische Druck direkt gemessen werden kann. Für die verschiedenen Abstände l vom Winderzeuger und jeweils für verschiedene Abstände r von der Mittelachse des Luftstroms ergaben sich folgende Manometer-Werte:

Radius r [cm]	$l=10$ cm	$l=20$ cm	$l=30$ cm	$l=40$ cm	$l=50$ cm
-7	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04
-6	0,05	0,08	0,05	0,05	0,06
-5,5	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
-5	0,2	0,15	0,1	0,1	0,08
-4,5	0,28	0,18	0,12	0,11	0,09
-4	0,49	0,29	0,2	0,14	0,11
-3	0,52	0,4	0,3	0,21	0,18
-2	0,49	0,48	0,35	0,26	0,21
-1	0,45	0,48	0,4	0,31	0,26
0	0,42	0,45	0,4	0,35	0,29
1	0,45	0,48	0,4	0,31	0,26
2	0,49	0,48	0,35	0,26	0,21
3	0,52	0,4	0,3	0,21	0,18
4	0,49	0,29	0,2	0,14	0,11
4,5	0,28	0,18	0,12	0,11	0,09
5	0,2	0,15	0,1	0,1	0,08
5,5	0,08	0,09	0,08	0,09	0,07
6	0,05	0,08	0,05	0,05	0,06
7	0,01	0,01	0,02	0,04	0,04
	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]

Trägt man die Messwerte dreidimensional auf, so hat man den Druckverlauf im Luftstrom visualisiert (Achtung: nichtlineare Skala für r in den Außenbereichen, dafür aber exaktere Darstellung dieser Bereiche!):



Wie erwartet nimmt der Druck mit zunehmender Entfernung vom Winderzeuger (symbolisiert durch den roten Pfeil) und zu den Randbereichen hin ab. Der relativ unstetige Druck in der Mitte ganz nah an der Düse bei $l = 10$ cm ist wahrscheinlich durch die Bauart der Düse bedingt. Deshalb ist es nicht günstig, die nun folgenden Messungen an dieser Stelle durchzuführen, da hier der Luftstrom nicht als ortsunabhängig angenommen werden kann. Weitgehend konstante Werte finden wir allerdings für kleine Radien im Abstand $l = 20$ cm, wie auch die nur wenig von 0,45 mbar abweichenden Werte aus der Tabelle zeigen (für Radien $r < 2,5$ cm). Deshalb führen wir alle weiteren Messungen im Punkt $l = 20$ cm, $r = 0$ cm durch.

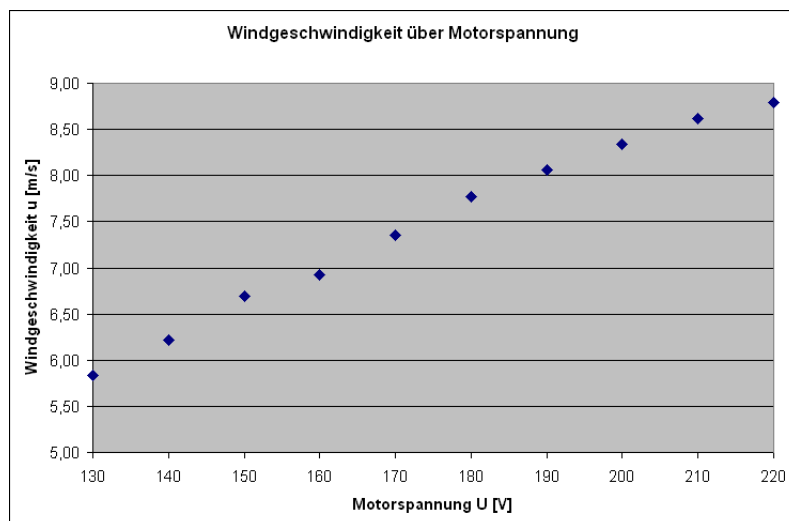
1.2 Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der Motorspannung

Für die weiteren Versuche benötigen wir den Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und angelegter Motorspannung in unserem Messpunkt. Um diesen Zusammenhang zu finden, befestigten wir das Prandtl-Staurohr im Abstand $l = 20$ cm vom Winderzeuger und im Radius $r = 0$ cm relativ zu dessen Mittelachse. Dann stellten wir verschiedene Motorspannungen ein und registrierten den Staudruck im Prandtl-Rohr. In der Vorbereitung haben wir die Formel für die Relation zwischen Windgeschwindigkeit u und Staudruck p_d hergeleitet:

$$u = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_d} \quad (1)$$

Mit der Luftdichte $\rho = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ergibt sich folgende um die errechnete Geschwindigkeit und logarithmische Werte ergänzte Messwerttabelle:

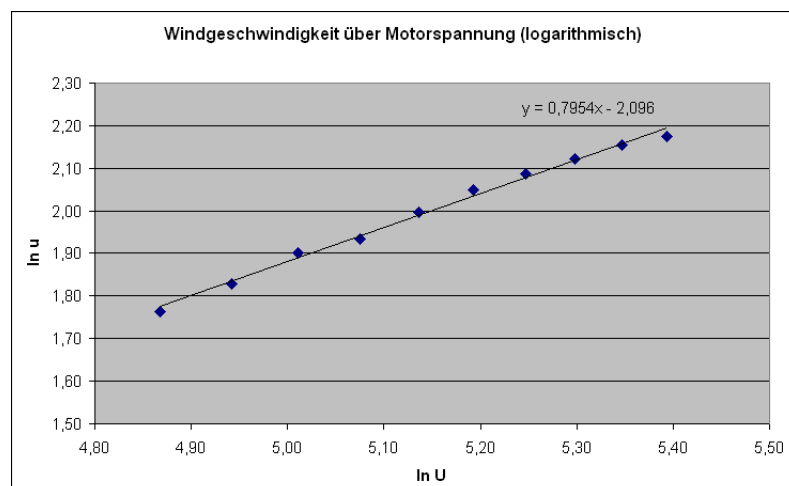
Motorspannung U [V]	Dynamischer Druck p_d [mbar]	Windgeschwindigkeit u [$\frac{m}{s}$]	$\ln U$	$\ln u$
130	0,22	5,83	4,87	1,76
140	0,25	6,22	4,94	1,83
150	0,29	6,70	5,01	1,90
160	0,31	6,92	5,08	1,94
170	0,35	7,36	5,14	2,00
180	0,39	7,77	5,19	2,05
190	0,42	8,06	5,25	2,09
200	0,45	8,34	5,30	2,12
210	0,48	8,62	5,35	2,15
220	0,5	8,79	5,39	2,17



In der Vorbereitung haben wir weiter gezeigt, wie man den Exponenten m der „Motorspannungsgleichung“ $u = \text{const} \cdot U^m$ ermittelt:

$$m = \frac{\ln u}{\ln U} \quad (2)$$

Um m nun zu bestimmen, tragen wir $\ln u$ über $\ln U$ auf und lassen Excel die Ausgleichsgerade berechnen, deren Steigung gerade m ist. In unserem Fall errechnet sich also der Wert $m \approx 0,8$.



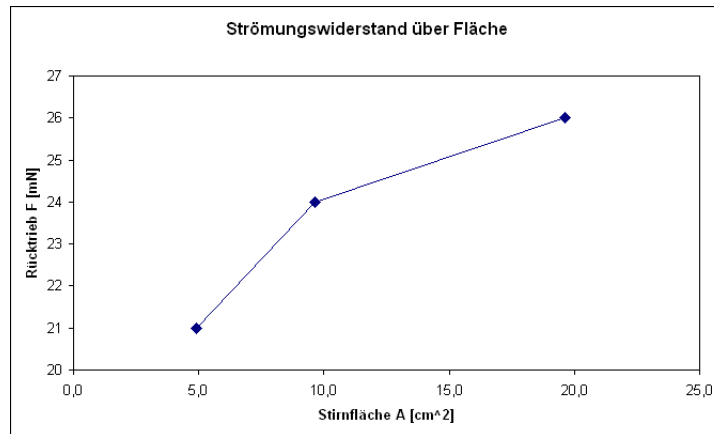
2 Strömungswiderstand

2.1 Rücktrieb und Stirnfläche

Jetzt werden an unserer Messposition bei konstanter Motorspannung $U = 200$ V verschieden große Kreisscheiben in den Luftstrom gehalten und die Kraft F gemessen, die der Luftstrom auf sie ausübt. Hierzu leiteten wir die Kraft per Faden und Umlenkrollen auf einen Kraftmesser um. Um den Fehler gering zu halten, maßen wir zunächst die Kraft auf den Haltestiel ohne Kreisscheibe. Mit diesem systematischen Fehler von in unserem Fall 6 mN korrigierten wir die anderen Messwerte nach unten.

Kreisscheibe	Radius [cm]	Fläche A [cm^2]	Kraft F_{mess} [mN]	Kraft F_{korr} [mN]	$\frac{F}{A}$ [$\frac{N}{m^2}$]
kleine	1,25	4,9	27	21	43
mittlere	1,75	9,6	30	24	25
große	2,5	19,6	32	26	13

Trägt man den Strömungswiderstand über der Fläche auf, erhält man folgendes Diagramm:



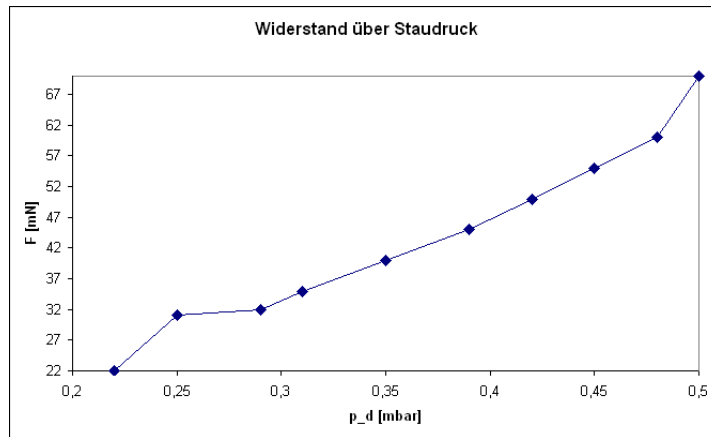
Leider lässt sich der in der Vorbereitung theoretisch hergeleitete lineare Zusammenhang der beiden Größen weder im Diagramm noch durch den Quotienten der beiden Größen in der Tabelle vernünftig verifizieren. Hier muss in unsere Messung ein großer Fehler eingegangen sein, was aber angesichts der etwas wackligen Anordnung von Kraftmesser, Umlenkrollen etc. nicht verwundert. Außerdem ist zu befürchten, dass durch die größere Auslenkung bei den größeren Kreisscheiben die Stirnfläche relativ zum Luftstrom deutlich abgenommen hat, weshalb die Fläche, auf die der Luftstrom einwirkt, kleiner als A ist und somit eine zu geringe Kraft gemessen wird.

2.2 Rücktrieb und Strömungsgeschwindigkeit

In diesem Versuchsteil verwendeten wir lediglich die kleine Kreisscheibe, allerdings bei variabler Motorspannung U und damit auch variabler Windgeschwindigkeit bzw. variablem Staudruck in unserem Messpunkt. Mit dem Kraftmesser ermittelten wir für jede Motorspannung den zugehörigen Rücktrieb. Die Werte finden sich in der folgenden Tabelle, wobei der zu jeder Motorspannung gehörende Staudruck p_d in unserem Messpunkt aus Aufgabe 1.2 stammt:

Spannung U [V]	Staudruck p_d [mbar]	Kraft F [mN]
130	0,22	22
140	0,25	31
150	0,29	32
160	0,31	35
170	0,35	40
180	0,39	45
190	0,42	50
200	0,45	55
210	0,48	60
220	0,5	70

Trägt man nun den Widerstand bzw. den Rücktrieb F über dem Staudruck auf, lässt sich der in der Vorbereitung vermutete lineare Zusammenhang recht gut erkennen:



2.3 Rücktrieb und Körperform, Oberflächenbeschaffenheit







In der Vorbereitung haben wir gezeigt, dass der Widerstandsbeiwert folgendermaßen berechnet werden kann:






$$c_w = \frac{F}{p_d \cdot A} \quad (3)$$

Um nun den c_w -Wert verschiedener Körper zu bestimmen, halten wir diese an dem in 1.1 festgelegten Messpunkt in den Luftstrom, dessen Erzeuger wir auf eine Spannung von konstant 200 V stellen. In unserem Fall gilt:

- Nach Aufgabe 1.2 beträgt der Staudruck im Messpunkt bei 200 V Motorspannung $p_d = 0,45$ mbar.
- Mit dem Lineal ermittelten wir den Durchmesser der Stirnflächen der Körper (diese ist bei allen Körpern gleich groß). Aus dem Durchmesser von 2,5 cm folgt, dass jeder Körper die Stirnfläche $A = 4,9 \text{ cm}^2$ besitzen muss.

Mit dem Kraftmesser ermittelten wir für jeden Körper die Rücktriebskraft F unter den oben genannten Bedingungen und errechneten daraus mit Formel (3) den jeweiligen Widerstandsbeiwert. In der folgenden Tabelle sind nun die gemessene Rücktriebskraft, der daraus errechnete c_w -Wert und der Literatur- c_w -Wert angeführt.

Körper						
Rücktriebskraft F [mN]	26	25	31	25	31	26
c_w (errechnet)	1,18	1,13	1,40	1,13	1,40	1,18
c_w (Literatur)	0,45	0,31	1,35	0,35	1,16	-

Körper						
Rücktriebskraft F [mN]	30	16	11	25	17	
c_w (errechnet)	1,36	0,72	0,50	1,13	0,77	
c_w (Literatur)	-	0,12	0,07	0,24	0,17	

Zunächst einmal müssen wir auch hier wieder feststellen, dass unsere Messwerte mit einem großen Fehler behaftet sein müssen, da große Abweichungen zur Literatur zu erkennen sind. Die Messwerte sind durchweg zu groß, so dass wir von einem systematischen Fehler unseres Aufbaus ausgehen können. Immerhin lassen sich trotzdem einige Aussagen darüber treffen, welche Körper-Form den c_w -Wert wie beeinflusst:

- Betrachtet man Halbkörper und Halbkugel, so fällt als erstes auf, dass die Messungen mit der runden Seite nach links (in den Luftstrom) einen geringeren c_w -Wert ergeben. Daraus folgt: Eine runde Vorderseite ist optimal, da die Luft an ihr die stärkste Umlenkung erfährt und somit am schnellsten parallel zur Oberfläche strömt.
- Vergleicht man nun die Körper mit der runden Seite nach links; auf der einen Seite Halbkörper und Halbkugel und auf der anderen Seite den Stromlinienkörper, so sticht sofort dessen deutlich geringerer c_w -Wert ins Auge. Obwohl die Vorderseite ja eigentlich baugleich zur Halbkugel ist, ist der Luftwiderstand geringer - wie ist das zu erklären? Nun, die flache Rückseite von Halbkugel oder -körper verursacht einen Unterdruck, der eine höhere Rücktriebskraft bedingt. Die spitze Rückseite vermeidet diesen Unterdruck, so dass beim Stromlinienkörper ein sehr geringer c_w -Wert gemessen wird.
- Beim Stromlinienkörper mit rauher Oberfläche messen wir einen deutlich größeren Luftwiderstand als bei seinem glatten Pendant, wie es zu erwarten war.

3 Tragflügel

3.1 Auftrieb und Strömungswiderstand

Wir maßen bei konstanter Windgeschwindigkeit bei einer Motorspannung von $U = 200V$, wobei wir den Anstellwinkel α in einem Bereich $-40^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ variierten. Es sollten Auftrieb und Strömungswiderstand einer ebenen und einer gebogenen Platte bestimmt und folgende Diagramme erstellt werden:

- a) Strömungswiderstand über Anstellwinkel
- b) Auftrieb über Anstellwinkel
- c) Auftrieb über Strömungswiderstand (*Polarendiagramm*)

wobei aus dem Polarendiagramm die günstigste sog. *Gleitzahl* zu ermitteln ist. Günstig heißt in diesem Fall, dass ϵ möglichst klein sein soll:

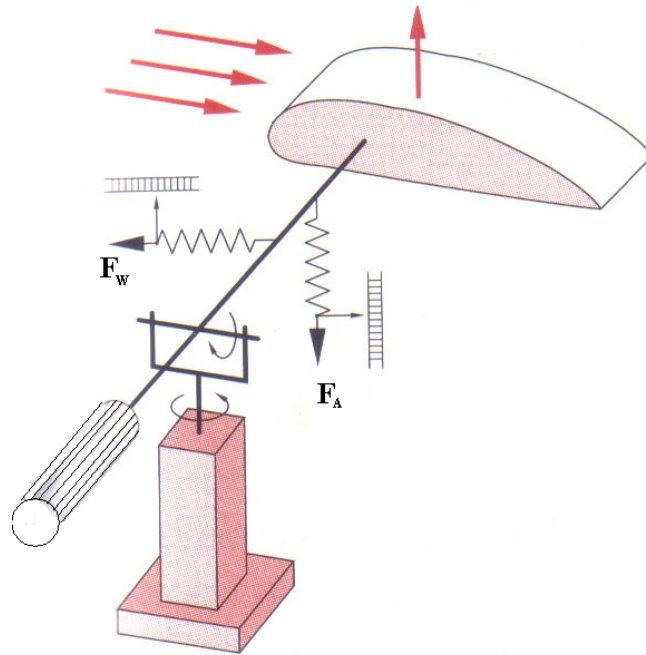
$$\epsilon = \frac{F_w}{F_a} \quad (4)$$

Die Gleitzahl ist ein Maß dafür, wieviel Höhe verloren wird, man kann aus ihr direkt den Höhenverlust y pro Meter berechnen:

$$\epsilon = \tan(y) \Rightarrow y = \arctan(\epsilon) \quad (5)$$

Je besser ein Körper also gleitet, desto weniger Höhe verliert er pro Meter. Die praktischste Form für den Flügel wird eine gebogene sein, denn hier strömt die Luft schneller über die gebogene Platte, was einen Unterdruck auf der Oberseite und damit Auftrieb erzeugt. Der Winkel für den geringsten Höhenverlust wird in der Gegend von 0° zu erwarten sein.

Der Aufbau war folgendermaßen:



Aufbau Aufgabe 3.1, Quelle: Demtröder

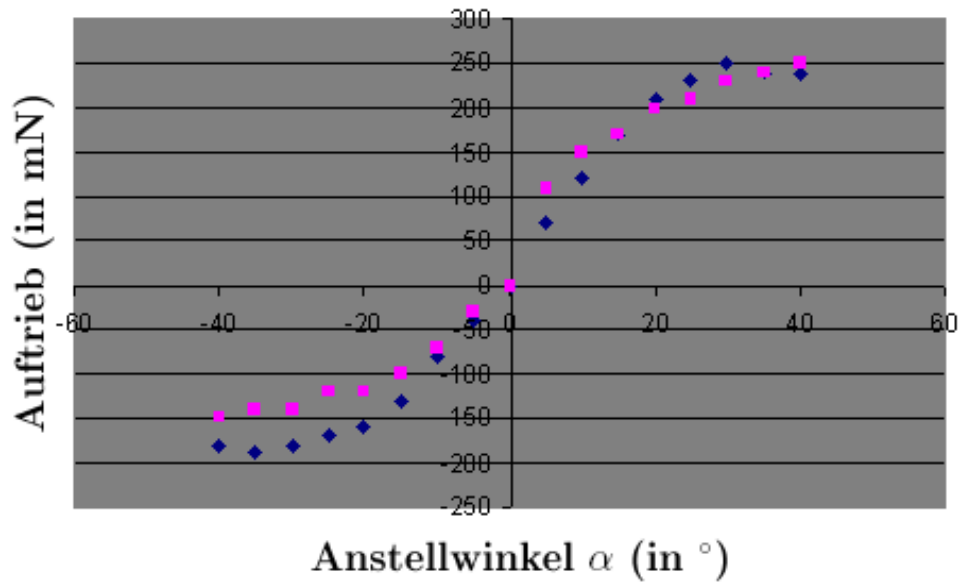
wobei hier Platten statt Tragflügel verwendet werden (s.Aufgabenteil 3.2). Auch wurden die Kräfte mittels der Kraftmesser nicht direkt von der (wie im Bild angedeutet) Haltestange aus gemessen wurden, sondern mittels an den Kraftmessern angebrachter Bindfäden, die über Umlenkrollen mit der Haltestange verbunden waren. Schon vor der ersten Messung ist klar, dass dies ein recht breites Fehlerpotential bietet, denn der Bindfaden müsste, um genaue Übertragung der Kraft zu liefern, gespannt sein. Dies ist aber nicht möglich, denn erstens zöge man dann auch immer an der Haltestange und zweitens bewirkt allein die Masse des Bindfadens ein Durchhängen, welches sich am Kraftmesser bemerkbar macht. Hinzu kommt die Reibung der Umlenkrolle.

Wir veränderten also den Anstellwinkel und maßen die auftretenden Kräfte. Es ergaben sich folgende Messwerte:

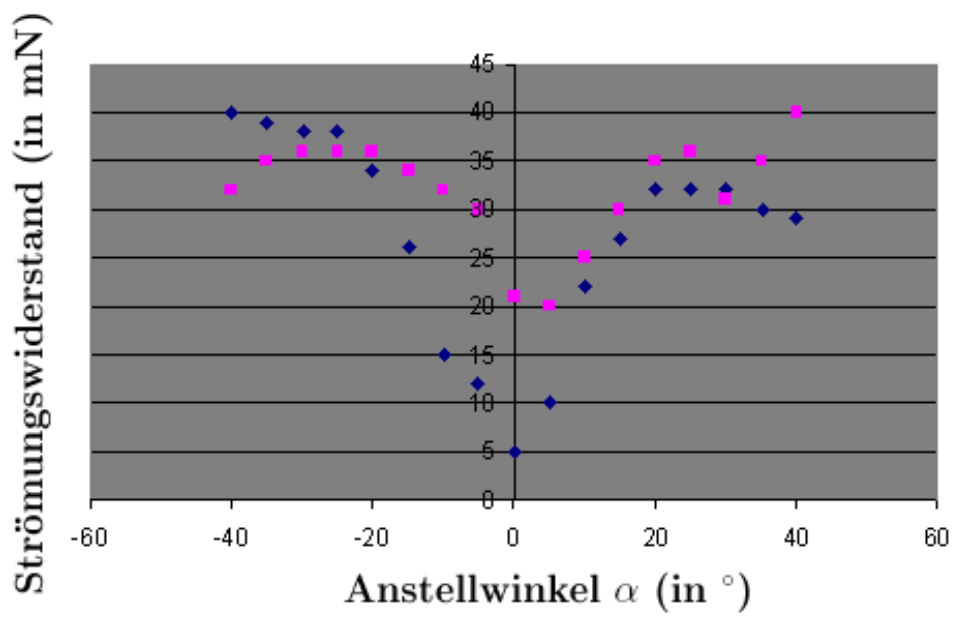
Winkel α (in $^\circ$)	ebene Platte	ebene Platte	gebogene Platte	gebogene Platte
	Auftrieb (in mN)	Strömungswiderstand (in mN)	Auftrieb (in mN)	Strömungswiderstand (in mN)
-40	-180	40	-150	32
-35	-190	39	-140	35
-30	-180	38	-140	36
-25	-170	38	-120	36
-20	-160	34	-120	36
-15	-130	26	-100	34
-10	-80	15	-70	32
-5	-40	12	-30	30
0	0	5	0	21
5	70	10	110	20
10	120	22	150	25
15	170	27	170	30
20	210	32	200	35
25	230	32	210	36
30	250	32	230	31
35	240	30	240	35
40	240	29	250	40

Hierbei stellt ein negativer Winkel die Situation dar, dass die Platte in Windrichtung nach oben zeigt, d.h. dass der Luftstrom zuerst auf die tiefste und zuletzt auf die höchste Stelle der Platte trifft.

Nun zu den geforderten Diagrammen:

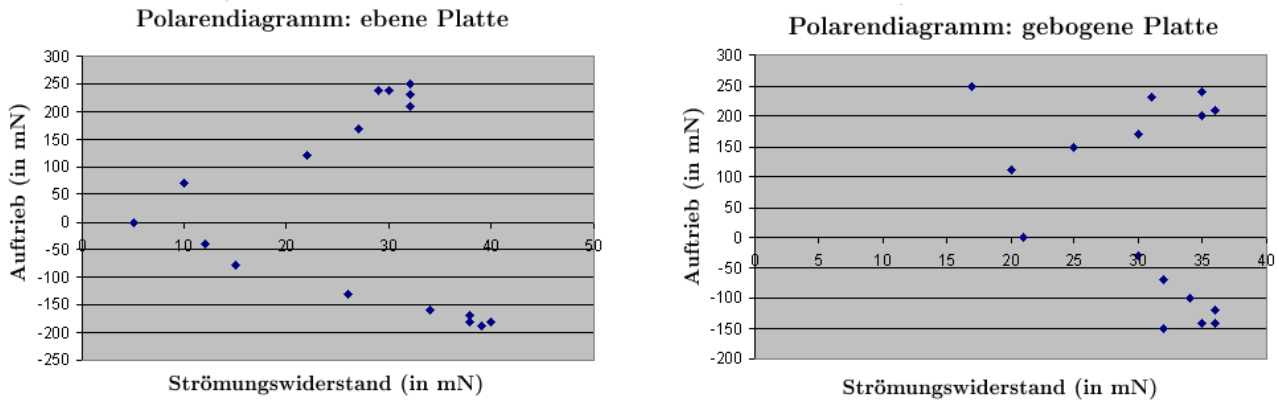


■ gebogene Platte ◆ ebene Platte



■ gebogene Platte ◆ ebene Platte

Als Polarendiagramme ergeben sich:



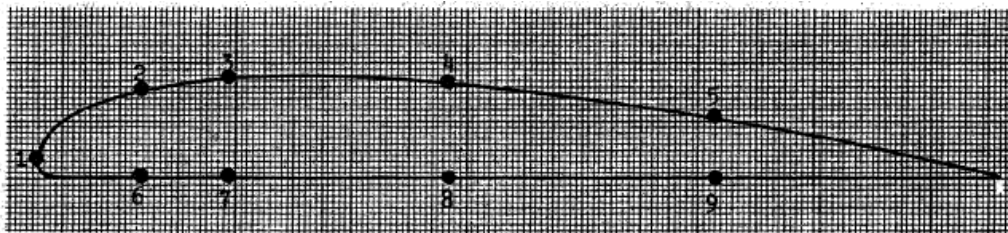
Hier lässt sich aufgrund der doch sehr gestreuten Werte nicht sehr gut mit Tangenten arbeiten, deshalb muss die Gleitzahl direkt aus dem Quotienten der beiden Kräfte bestimmt werden. Für die Gleitzahlen finden wir dann:

- bei der ebenen Platte findet sich ein Spektrum von $\epsilon = 0,18$ bei 10° bis $\epsilon = 0,12$ bei 40°
- bei der gebogenen Platte findet sich ein Spektrum von $\epsilon = 0,18$ bei 5° bis $\epsilon = 0,13$ bei 30°

Man könnte aus diesen Werten schließen, dass sich beide in ihren Flugeigenschaften nicht viel nehmen, jedoch glauben wir trotzdem, dass die gebogene Platte bessere Gleiteigenschaften besitzt. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Luft über dem gewölbten Tragflügel schneller strömt als über dem ebenen (Kontinuitätsgleichung). Der entsprechende statische Druck ist also geringer, der Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite größer. Daraus resultiert eine größere Auftriebskraft. Um nun also die Flugeigenschaften eines Tragflügels zu verbessern, ist es wichtig eine geeignete, am besten die optimale, Form zu finden und darüber hinaus diese Form mit dem optimalen Anstellwinkel zu kombinieren. Dabei kann die Tragflügelform stark vom Anwendungszweck abhängen. Ein reines Segelflugzeug benötigt ein anderes Tragflügelprofil als ein Motorflugzeug.

3.2 Tragflächendruck

Bei einer Motorspannung von $U = 200V$ maßen wir die Drücke an folgendem Tragflächenmodell:



Es sind 9 Orte vorhanden, für die die Druckmessung vorgesehen ist. Es sollten nun verschiedene Anstellwinkel, nach Angaben des Praktikumsbetreuers die Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = -20^\circ$ und $\alpha = 20^\circ$ abgemessen werden. Es ergaben sich folgende Messwerte:

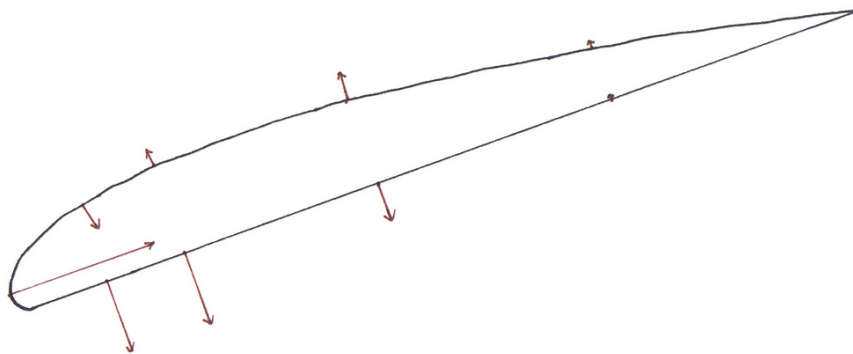
Messpunkt	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = -20^\circ$
1	0,72	0,2	0,6
2	-0,3	-0,55	0,1
3	-0,29	-0,3	-0,06
4	-0,1	-0,1	-0,08
5	-0,01	-0,05	-0,03
6	-0,1	0,3	-0,3
7	0	0,25	-0,3
8	0,2	0,1	-15
9	0,2	0,05	0,01

Für den Winkel gelte, dass der Winkel als negativ definiert sei, bei dem der Tragflügel „die Nase nach unten zieht“, d.h. das Ende des Flügels höher als die Spitze ist. Für den Druck erwarteten wir folgendes: bei den vorderen Messpunkten trifft die Luft direkt auf die Tragfläche, dementsprechend wird hier ein Überdruck herrschen, weiter hinten (2-5) sollte sich aufgrund der schnell vorbeiziehenden Luft ein Unterdruck bilden (dieser ist in den Messungen mit einem negativen Vorzeichen versehen). Die Luft ist über der Tragfläche schneller, da der Weg über die gewölbte Fläche länger ist als über die gerade Unterseite. Um zu veranschaulichen, wie sich der Druck bei der Tragfläche entwickelt, sollte der Flügel mit „Druckvektoren“ gezeichnet werden, d.h. mit senkrecht auf der Fläche stehenden Vektoren, deren Länge dem skalaren Wert des Drucks entspricht. Es bleibt die Frage der Richtung. Wir haben uns für folgende Zeichnungsweise entschieden: da die für uns relevante Fragestellung lautet, wie ein Tragflügel am besten aussehen müsste, um zu fliegen, bzw. wie der Anstellwinkel für den gegebenen Tragflügel am besten zu wählen ist, ist es wichtig zu wissen, wie stark er durch die beiden unterschiedlichen Kräfte Auftrieb erfährt. Zur Erinnerung:

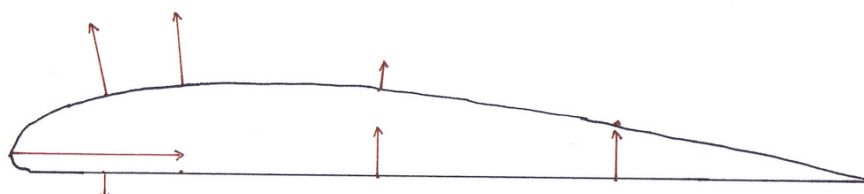
- Unterdruck über dem Flügel zieht ihn nach oben
- Überdruck unter dem Flügel drückt ihn nach oben

Folglich wurde so gezeichnet: bei den Messpunkten 2-5 wird ein Unterdruck als Vektor nach oben, also in hypothetische Flugrichtung verstanden. Ein Überdruck (positives Vorzeichen) an diesen Messpunkten hätte zur Folge, dass der Flügel nach unten gedrückt würde. Umgekehrt wird mit den Messpunkten 6-9 verfahren: tritt hier ein positives Vorzeichen bei den Messwerten auf, so bedeutet das einen Überdruck, der den Flügel nach oben drücken würde, also ist der Vektorpfeil nach oben gezeichnet. Ein negatives Vorzeichen hieße, dass ein Unterdruck herrschte, der den Flügel nach unten zöge, also wäre der Vektor nach unten zeigend. Der Sinn dieser Zeichnungsweise besteht darin, dass man sofort erkennt, ob der Flügel beim jeweiligen Anstellwinkel günstig oder ungünstig im Wind steht: hätte man nämlich ausreichend viele Messpunkte, so könnte man schlicht die Pfeile per Vektoraddition aneinandersetzen und erhielte die ungefähre Richtung, in die der Flügel gedrückt werden würde. Dieser Gesamtvektor wurde hier der Übersicht halber und wegen sehr großer Unterschiede an den einzelnen Messpunkten nicht gezeichnet, eine grobe Einschätzung lässt sich aber leicht mit bloßem Auge durchführen.

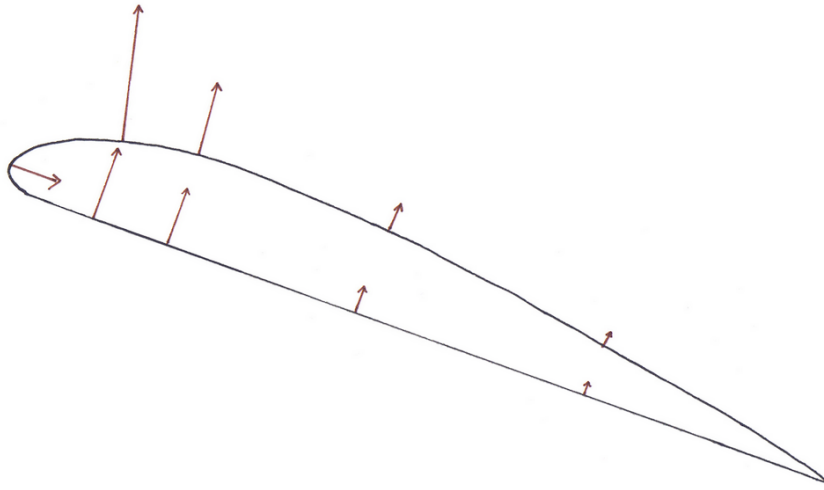
- Anstellwinkel $\alpha = -20^\circ$



- Anstellwinkel $\alpha = 0^\circ$



- Anstellwinkel $\alpha = 20^\circ$



Aus der Betrachtung dieser Darstellung könnte man folgern, dass ein Anstellwinkel, der sich etwa in der Region von $\alpha = 0^\circ - 10^\circ$ befindet, am geeignetsten ist.